

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ

Болдырев Г.Г., Пензенский университет архитектуры и строительства,
ООО «НПП-Геотек»

Колесников А.С., аспирант Пензенского университета архитектуры
и строительства

Новичков А.Г., аспирант Пензенского университета архитектуры
и строительства

Аннотация: в статье приведена процедура определения характеристик прочности дисперсных грунтов по данным испытаний в условиях одноплоскостного среза и трехосного сжатия.

Ключевые слова: одноплоскостной срез, простой сдвиг, трехосное сжатие, траектории нагружения, угол внутреннего трения, силы удельного сцепления, недренированная прочность

Введение

Прочностные характеристики грунтов используются при проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений по первой группе предельных состояний – по несущей способности. Несущая способность оснований определяется с использованием двух групп методов расчета. К первой группе следует отнести аналитические и инженерные методы [5,6,7,8], вторая группа включает методы, основанные на численных решениях с использованием различных моделей грунтов [9,10,11,12,16]. Во всех методах расчета используются прочностные характеристики грунтов, определяемые путем испытаний образцов грунта в приборах различной конструкции и с использованием различных методов испытаний [2,3,4]. К этим характеристикам относятся: дренированный и недренированный углы внутреннего трения; силы удельного сцепления; недренированная прочность и угол дилатансии.

В большинстве методов расчета первой группы используются условия прочности Кулона или Мора-Кулона. Первое условие прочности (1-5) связывает прочность грунта с нормальным давлением σ , а второе (6,7) с минимальным σ_3 и максимальным σ_1 главными напряжениями. Во второй группе методов расчета используются не только условие прочности Мора-Кулона, но и ряд других условий, некоторые из которых связывают прочность грунтов не только с двумя, но и с тремя главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Практически во все условия прочности входят коэффициенты, которые мы называем характеристиками прочности [3,4] или параметрами прочности (за рубежом).

В зависимости от условий испытаний образцов грунта, при обработке данных измерений, используются следующие условия прочности:

а) консолидированно-дренированный сдвиг

$$\tau = \sigma_v \operatorname{tg} \varphi' + c', \quad (1)$$

б) консолидированно-недренированный сдвиг

$$\tau = (\sigma_v - u) \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2)$$

в) для водонасыщенных в природном состоянии глинистых и органо-минеральных грунтов мягкопластичной и текучей консистенции, неконсолидированно-недренированный сдвиг

$$\tau = c_u, \quad (3)$$

г) для маловлажных грунтов в условиях консолидированно-недренированного сдвига

$$\tau = (u_a - u) \operatorname{tg} \varphi^b + (\sigma_v - u) \operatorname{tg} \varphi' + c', \quad (4)$$

д) при больших деформациях сдвига

$$\tau = \sigma_v \operatorname{tg} \varphi'_r + c'_r, \quad (5)$$

где τ – касательное напряжение, при котором происходит разрушение грунта; σ_v – эффективное нормальное напряжение; φ' – эффективный угол внутреннего трения; φ и c – дренированные угол внутреннего трения и силы удельного сцепления, соответственно; c' – эффективные силы удельного сцепления; u_a – давление порового воздуха; u – давление поровой воды; φ^b – угол внутреннего трения, зависящий от величины матричного всасывания; φ'_r и c'_r – остаточные, угол внутреннего трения и силы удельного сцепления, соответственно; c_u – недренированная прочность. В сыпучих грунтах параметр c' не превышает 2–5 кПа и, как правило, не учитывается.

Условие прочности Мора-Кулона в главных напряжениях имеет вид – для песчаных, гравелистых и крупнообломочных грунтов

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}, \quad (6)$$

– для глинистых грунтов

$$(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3 + 2 c \operatorname{ctg} \varphi) = \sin \varphi. \quad (7)$$

Параметры, входящие в уравнения (1-3,6,7), необходимы при проектировании оснований сооружений с использованием решений, которые приведены в СП 22.13330, СП 24.13330 и др.

Используя результаты трехосных испытаний, предельную огибающую Мора–Кулона можно построить различным образом, так как показано на рис. 1а, б, с.

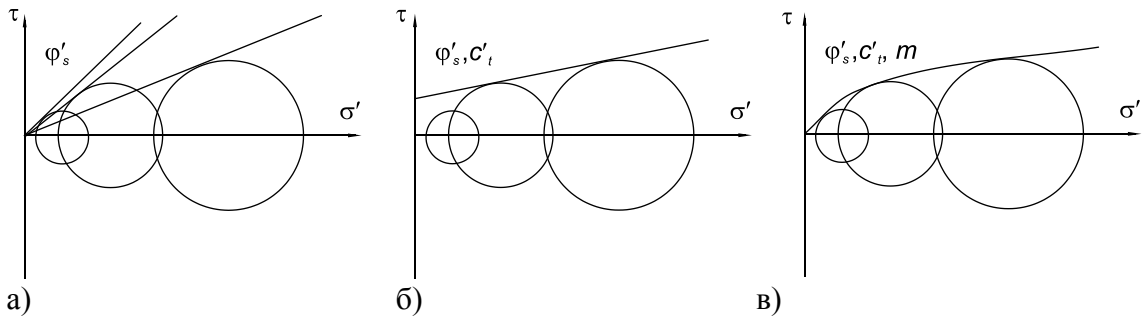


Рис. 1. Предельные огибающие: а – секущий угол внутреннего трения; б – касательный угол внутреннего трения; в – угол внутреннего трения, зависящий от угла наклона предельной огибающей

На рис. 1а грунт является чисто фрикционным материалом (например, песок) и его прочность определяется только трением. Условие прочности для каждого круга Мора (напряженного состояния) имеет вид:

$$\tau = \sigma' \operatorname{tg} \varphi_s, \quad (8)$$

где φ_s – секущий угол внутреннего трения; σ' – эффективное нормальное напряжение.

Очевидно, что если использовать метод секущих, то прочность на сдвиг будет переоценена на высоких уровнях напряжений σ и недооценена на низких уровнях напряжений. Поэтому надежность расчетов прочности будет зависеть от того совпадут или нет условия испытаний грунта в лаборатории с уровнем напряжений в основании сооружений.

Предельная прямая может быть также получена как лучшая касательная к кругам Мора (рис. 1б) и условие прочности может быть записано в виде (1). В общем случае (рис. 1в) касательную к кругам Мора провести невозможно из-за нелинейной зависимости предела прочности от нормального давления. Предельная прямая заменяется огибающей к кругам Мора. На отдельных участках нормального давления она может быть аппроксимирована прямой.

В ГОСТ 12248 [3] предусмотрено определение характеристик прочности с использованием касательной к кругам Мора (рис. 1б). В результате находятся угол внутреннего трения и силы удельного сцепления. В численных методах расчета используются модели грунта, в которых прочность зависит от уровня среднего напряжения (рис. 1в), а зависимость (1) является нелинейной. Кривизна, огибающей к кругам Мора различна

и зависит от уровня среднего напряжения $\sigma_c = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 = \sigma_v$. В интервале 100 – 200 кПа она хорошо аппроксимируется уравнением (1), что и используется на практике. В области больших средних напряжений (более 600 кПа) прочность может уменьшаться с ростом давления. В области малых средних напряжений (до 100 кПа) используется условие прочности вида (8) и определяется только секущий угол внутреннего трения (см. рис. 2).

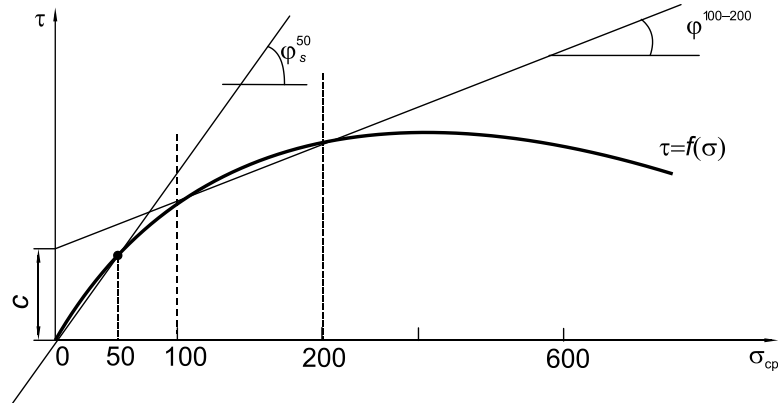


Рис. 2. Зависимость прочности грунта от среднего напряжения

Дренированная прочность нормально уплотненных глин подобна рыхлым пескам, т.е. $c=0$, за исключением того, что для глин угол внутреннего трения меньше. Эмпирическая зависимость эффективного угла внутреннего трения φ' , с индексом пластичности для нормально уплотненных глин показана на рис. 3.

Дренированная прочность переуплотненной глины подобна прочности плотного песка (но опять с меньшим значением φ'), где имеется пиковая прочность (c' не равно нулю) и остаточная прочность ($c' = 0$).

В общем случае при проектировании оснований, сложенных глинистыми грунтами, используются результаты недренированных и дренированных условий и, исходя из этого, расчеты выполняются различными способами. Выбираются, как правило, худшие условия. Полные напряжения используются в анализе, если встречаются недренированные условия нагружения и эффективные напряжения в дренированном случае.

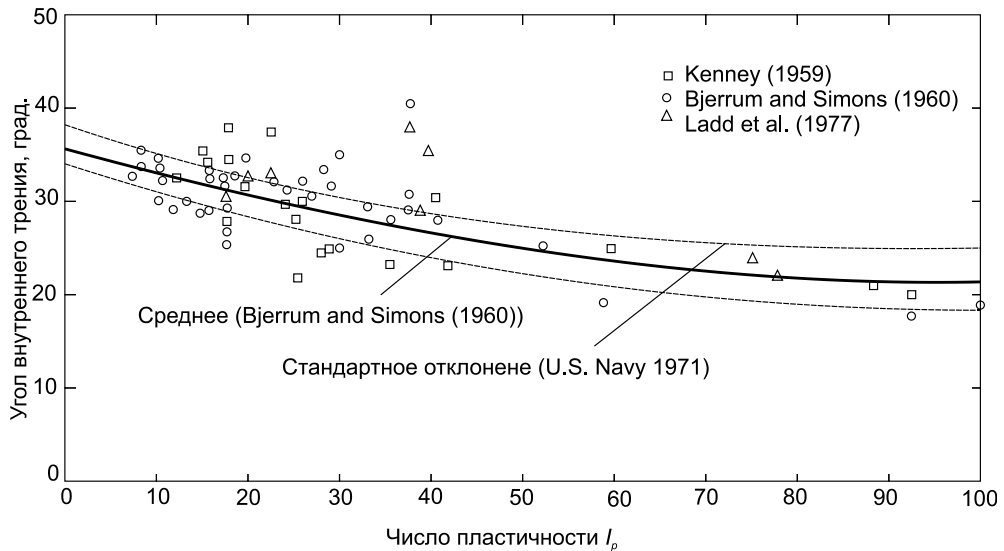


Рис. 3. Эмпирическая связь между углом внутреннего трения из трехосных испытаний и числом пластичности для переуплотненной глины [17]

В связи с тем, что в СП 22.13330 истощение прочности дисперсных грунтов описывается с использованием условия прочности Кулона (нормальные напряжения) или Мора-Кулона (главные напряжения), то в ГОСТ 12248 были введены методы определения характеристик прочности, входящие в отмеченные выше уравнения.

Эти характеристики определяются в приборах различной конструкции. Тип прибора и метод испытаний выбираются в зависимости от метода расчета несущей способности или условия прочности. Для первой группы методов расчета методы испытаний нормированы в большинстве стран, в том числе и в России. Это методы: одноосного сжатия; одноплоскостного среза; простого сдвига; лопастного среза и трехосного сжатия. При определении параметров прочности для второй группы методов расчета несущей способности оснований применяются как все перечисленные методы испытаний, так и специальные испытания, такие как испытания кубических образцов в условиях истинного трехосного сжатия или испытания полых цилиндрических образцов. В последних случаях параметры прочности определяются в опытах при независимом действии всех трех главных напряжений.

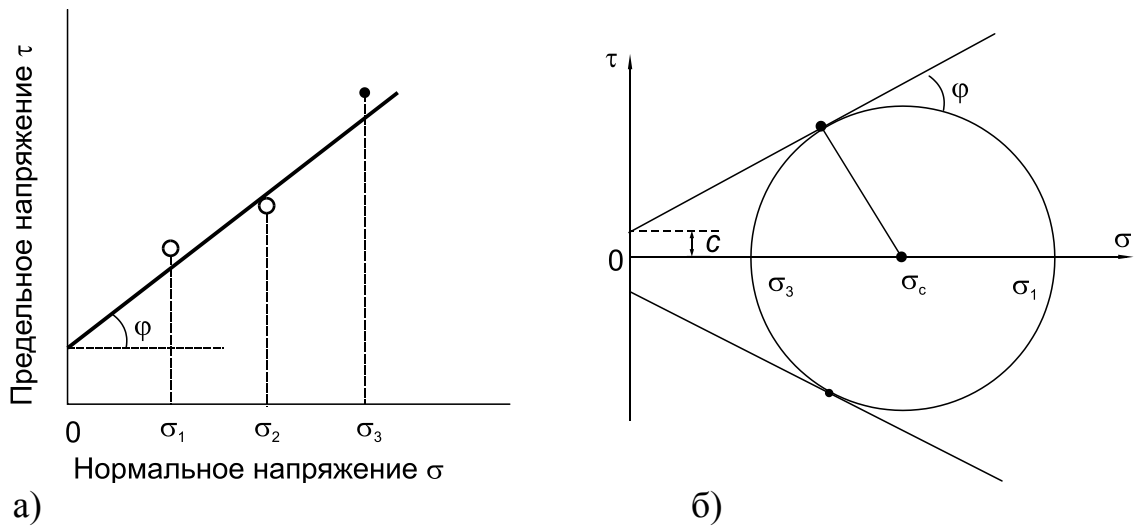


Рис. 4. Условия прочности используемые в СП 22.13330:
а – Кулона; б – Мора-Кулона

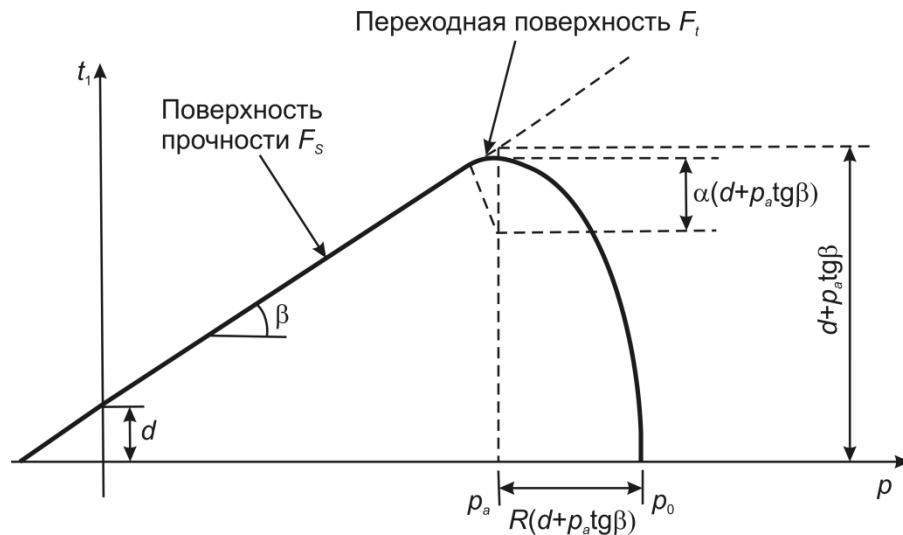


Рис. 5. Условие прочности, используемое в модели грунта «Сар» и «Сам-Clay»
[9,10,13,16]

Выбор соответствующих параметров прочности при проектировании оснований зданий и сооружений должен быть, как минимум, основан на решении следующих вопросов:

- 1) как быстро будет нагружаться основание из водонасыщенных или неводонасыщенных грунтов (недренированная и дренированная прочность);
- 2) как условия нагружения будут оказывать влияние на прочность грунта;
- 3) какой уровень деформаций будет иметь место в основании будущих сооружений и, при каком уровне деформаций следует определять параметры прочности;
- 4) какая нагрузка будет действовать на основание – статическая или динамическая.

На рис. 6 показан пример зависимости прочности грунта от условий нагружения в рассматриваемой точке массива основания. При достижении предельной нагрузки по устойчивости основания фундамента мелкого

заложения или в рассматриваемом случае основания насыпи, в них наблюдается сдвиг грунта с выпором на поверхность. Смещаемый объем грунта (призма выпора) можно разделить на три области. В первой области имеет место активное состояние грунта, в третьей – пассивное состояние грунта, а во второй – промежуточное состояние. В соответствии с этим, в пределах каждой области на соответствующих участках поверхности скольжения АВСД находятся элементы грунта, в которых присутствуют различные условия нагружения. В первой области прочность грунта обусловлена его сжатием и испытания образцов грунта в данной области следует проводить в условиях трехосного сжатия по траектории сжатия (СТС) [2]. В третьей области имеет место расширение грунта по направлению к свободной ненагруженной поверхности основания, и, следовательно, испытания образцов грунта в данной области следует проводить в условиях трехосного расширения по траектории расширения (СТЕ). В переходной, второй, области массива грунта деформация элемента грунта, подобна той, которая имеет место в условиях прямого среза или простого сдвига. Поэтому прочность грунта, в данной области следует определять из испытаний образцов в условиях одноплоскостного среза или простого сдвига.

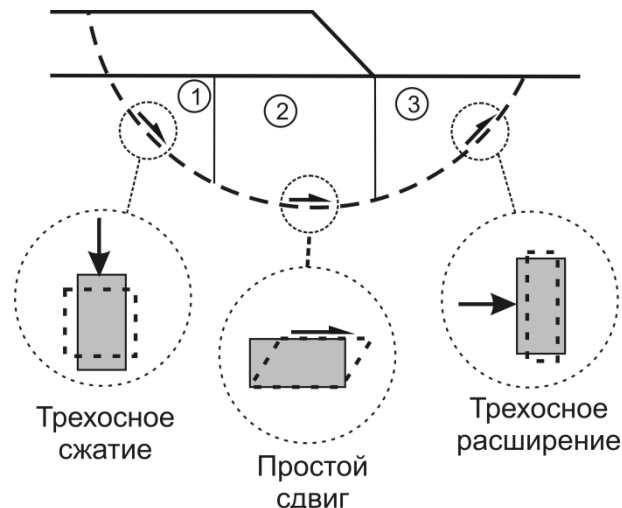


Рис. 6. Три зоны в призме выпора с различным напряженным состоянием:
1 – сжатие; 2 – прямой срез; 3 – расширение

На рис. 7а показаны зависимости «деформация – напряжение» полученные при различных траекториях нагружения, а на рис. 7б предельные прямые Мора – Кулона для этих траекторий нагружения. Как видно из этих рисунков параметр прочности сыпучего грунта угол внутреннего трения получен различным. При сжатии грунта он больше, чем при расширении. Таким образом, на участке поверхности скольжения АВ сопротивление сдвигу будет больше, чем на участке СД, той же поверхности скольжения АВСД.

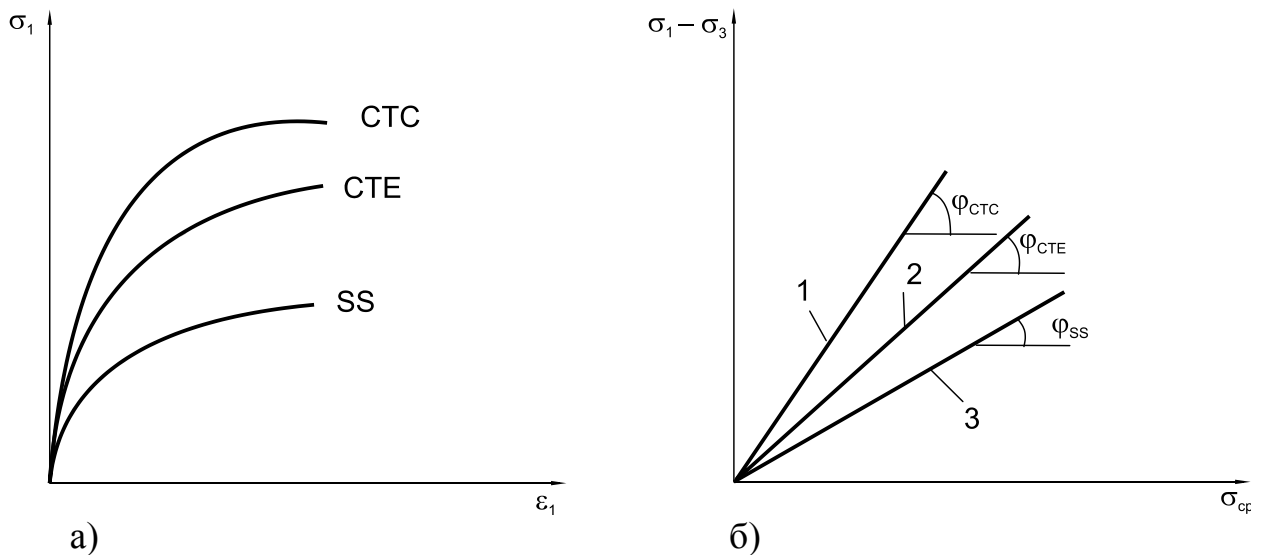


Рис. 7. Влияние траекторий нагружения на прочность грунта:
 а – вид зависимости «осевое напряжение – деформация»; б – предельные прямые; 1 – сжатие; 2 – расширение; 3 – прямой срез

Как видно из рис. 7а, на малых уровнях напряжений кривые зависимости «напряжение-деформация» при различных траекториях нагружения совпадают, но на более высоком уровне напряжений различия существенны. Это показывает, что траектория нагружения оказывает влияние на поведение грунта. Однако прочность грунта в большей степени, чем его деформируемость, зависит от траектории нагружения.

При обработке результатов испытаний с использованием условий прочности Кулона или Мора – Кулона используется линейная зависимость между касательным напряжением и нормальным давлением. ГОСТ 12248 рекомендует проводить испытания на прочность, используя три ступени нормального давления. В зависимости от вида грунта они принимаются в диапазоне от 100 до 500 кПа (табл. 5.1 [3]). Получив три значения предела прочности и используя линейную аппроксимацию можно построить предельную прямую, которая показана на рис. 4а,б.

Если же теперь провести испытания на срез при нормальных давлениях менее 100 кПа мы получим резко отличные значения предела прочности, к которым неприменима линейная аппроксимация. Предельная прямая заменяется предельной огибающей, которая является криволинейной. На рис. 8 показаны предельные огибающие в различном диапазоне нормального давления. Первая предельная огибающая (рис. 8а) построена из испытаний образцов при нормальном давлении менее 100 кПа, а вторая при давлении от 100 до 300 кПа. Из рис. 8а видно, что в зависимости от того как мы проведем прямую линию мы получим различные значения сил сцепления и угла внутреннего трения. Учитывая эту неопределенность, рекомендуется определять только угол внутреннего трения из угла наклона прямой к соответствующему значению нормального давления. Параметр «характеризующий» силы сцепления принимается в этом случае равным

нулю. Угол внутреннего трения называется секущим. Этот прием используется для оценки прочности грунта в основании насыпей, если нагрузка от собственного веса насыпи не превышает 100 кПа. Отмеченная особенность нелинейной прочности грунта учтена в модели грунта №147, используемая при проектировании оснований автомобильных дорог в США федеральным агентством скоростных дорог [16].

На первом графике, рис. 8а показаны значения двух касательных и одной секущей к предельной огибающей прочности. Первая касательная характеризуется углом внутреннего трения φ_0 , вторая касательная φ_p и секущая имеет значение ψ_p . Секущий угол внутреннего трения сыпучего грунта является величиной переменной, уменьшающийся с ростом нормального напряжения. Особенно резко указанная зависимость проявляется в интервале нормальных напряжений менее 100 кПа. При более высоких нормальных напряжениях $\sigma_a = 100$ кПа и $\sigma_b = 300$ кПа величина $\varphi = \varphi_{const}$ практически постоянна.

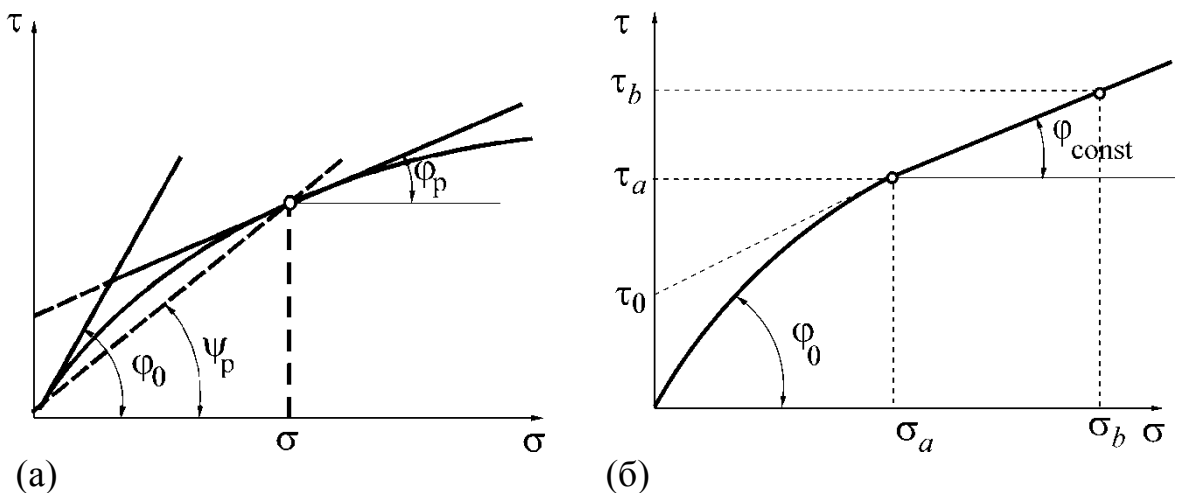


Рис. 8. Предельные огибающие:

а – при малых давлениях; б – в интервале стандартного давления 100-300 кПа

В зависимости от вида нагружения (статическое или кинематическое), вида и состояния грунта (нормально уплотненный или переуплотненный) можно в опытах на сдвиг получить три кривых деформирования, которые показаны на рис. 9. Первая кривая характеризуется разрушением грунта при постоянном предельном касательном напряжении τ_{max} и росте деформации сдвига. Вторая кривая характеризует состояние грунта, который в процессе деформирования упрочняется и на ней невозможно найти точку, соответствующая пределу прочности τ_{max} . Третья зависимость описывает поведение грунта при сдвиге, который упрочняется до τ_{max} , а затем с ростом деформации сдвига прочность уменьшается до остаточной $\tau_{ост}$.

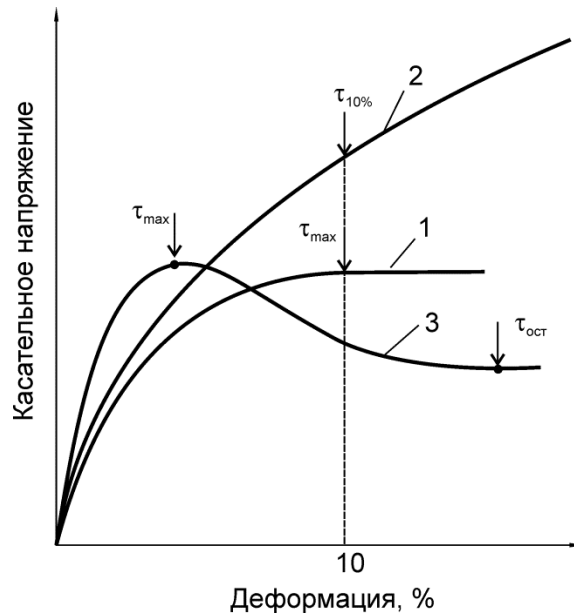


Рис. 9. Кривые деформирования при сдвиге:
1 – идеально-пластическое деформирование; 2 – деформирование с упрочнением; 3 – деформирование с разупрочнением

Если на 1 и 3 зависимостях можно найти предел прочности, который характеризуется максимумом касательного напряжения, то на второй зависимости его нет. Поэтому принято за предел прочности в этом случае принимать значение девиатора напряжений, соответствующее $\varepsilon_1 = 15\%$ осевой деформации в опытах на трехосное сжатие и касательное напряжение при 10% деформации в условиях одноплоскостного сдвига.

Как видно из условий прочности (1-8), прочность грунта зависит от величины нормального или среднего напряжения. Поэтому испытания образцов грунта на сдвиг должны быть проведены при ожидаемых напряжениях в основании зданий и сооружений. В ГОСТ 12249 пункт 5.1.4.1 принята следующая процедура определения нормального напряжения/давления в испытаниях в условиях одноплоскостного сдвига.

«...Значение максимального нормального давления p_{max} устанавливают в зависимости от предполагаемого напряженного состояния грунтового массива (с учетом передаваемых на основание нагрузок и бытового давления). Значения нормальных давлений p_{min} и p_i , при которых определяют сопротивление срезу τ , устанавливают как часть p_{max} (например, $0,25 p_{max}$, $0,5 p_{max}$ и т.д.). При отсутствии указанных данных значения p допускается принимать по табл. 5.1. Значения ступеней Δp принимают в соответствии с табл. 5.1 или равными удвоенным значениям предыдущей ступени.»

Давление предварительного уплотнения, которое прикладывается к образцу грунта на этапе подготовки к испытаниям на срез, как и последующее нормальное давление на образец грунта в приборе одноплоскостного сдвига рекомендуется принимать или расчетом или по табл. 5.1, двумя различными способами.

В первом случае, следует найти дополнительные напряжения σ_{zp} и напряжения от собственного веса грунта (бытовое давление, σ_{zg}) в основании будущего здания и сооружения (рис. 10). Если второе давление σ_{zg} найти сравнительно просто ($\sigma_{zg} = \gamma z$), то для определения дополнительных напряжений от веса сооружения необходимо иметь:

- инженерно-геологический разрез с выделенными инженерно-геологическими элементами (ИГЭ), их мощность и положение уровня грунтовых вод;
- удельный вес грунта в пределах каждого ИГЭ γ ;
- величину давления под подошвой фундамента p ;
- ширину и длину фундамента.

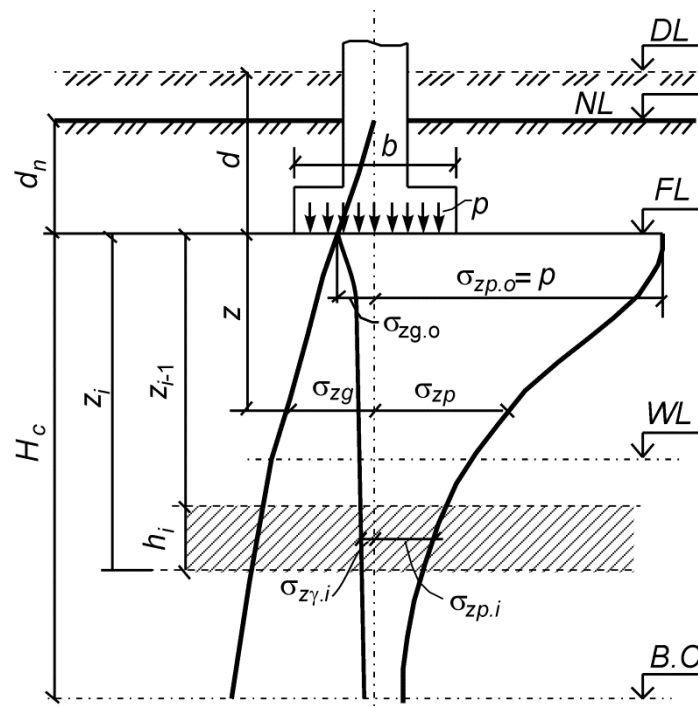


Рис. 10. Распределение напряжений с глубиной: слева – напряжения от собственного веса грунта; справа – дополнительные напряжения от нагрузки

Далее используя СП 22.13330, пп. 5.6.31 – 5.6.42 находят дополнительные напряжения в грунте под фундаментом и величину сжимаемой толщи H_c .

Найденное значение сжимаемой толщи определяет требуемую глубину изысканий, которая должна приниматься несколько более H_c .

Зная глубину отбора монолитов грунта и используя рис. 10, можно найти суммарное значение дополнительных напряжений и бытового давления на глубине отбора монолитов грунта. Далее это давление и следует прикладывать к образцу грунта в приборах предварительного уплотнения и одноплоскостного среза.

Подобные расчеты выполнить не совсем просто. Сложность заключается в отсутствии необходимой информации на стадии изысканий. Геолог не

знает нагрузку на основание как и размеры будущего фундамента. Проектировщик тоже этого не знает, так как не имеет инженерно-геологических условий и не может выбрать поэтому конструкцию фундамента.

Следовательно, геолог вынужден использовать табл. 5.1. Однако и здесь не все просто. В таблице приведены рекомендуемые ступени давления в зависимости от вида грунта. Чем «слабее» грунт, тем меньше ступень нормального давления. Количество ступеней нормального давления принято равным трем, исходя из того, что через три точки, соответствующие максимуму касательных напряжений, можно более точно провести предельную прямую, чем через две.

Рассмотрим для примера ситуацию, когда проводятся испытания на срез образцов глины с $I_L = 0,26$ по схеме консолидированно дренированного сдвига. Из табл. 5.1 находим, что для глины с $0,25 < I_L \leq 0,5$ значения нормального давления должны быть приняты равными 100; 200; 300 кПа. Выполнив испытания этого же грунта в условиях компрессионного сжатия, находим величину давления предварительного уплотнения $\sigma_p = 102$ кПа. Следовательно, принимая первую ступень нормального давления в 100 кПа, мы должны ожидать, что до давления $\sigma = \sigma_p = 102$ кПа уплотнения грунта не будет и только при нормальном давлении более 102 кПа образец грунта будет испытывать сжатие с изменением пористости. Для переуплотненных грунтов с $OCR > 2$ давление предварительного уплотнения может быть значительно выше 100 кПа.

Данный пример показывает, что ступени давления предварительного уплотнения в приборе одноплоскостного среза для переуплотненных грунтов, следует принимать с учетом давления предварительного уплотнения. Все ступени давления предварительного уплотнения должны приниматься более σ_p . В рассматриваемом примере давление предварительного уплотнения и нормальное давление следует принимать, добавив к 100, 200, 300 кПа давление предварительного уплотнения, равное 102 кПа. Более правильно использовать первую процедуру, когда к известным историческим напряжениям σ_p добавляются напряжения от внешней нагрузки, что и будет равно p_{\max} .

Данную процедуру необходимо применять и к другим видам грунтов, которые приведены в табл. 5.1, в том случае если они классифицированы как переуплотненные. Применение данной процедуры соответствует этапу реконсолидации.

Оценка результатов консолидированных испытаний

1. При интерпретации результатов испытаний должно быть принято во внимание то, что качество монолитов (нарушение структуры) оказывает большее влияние на недренированную прочность, параметры порового

давления и зависимость напряжение-деформация, чем на дренированные параметры прочности.

2. В зависимости от типа испытаний, может быть получена дренированная или недренированная прочность грунта. Соответствующими значениями являются эффективный угол внутреннего трения φ' , эффективные силы сцепления c' .

3. Эти характеристики используются при расчете устойчивости и прочности оснований для случая медленного возведения зданий и сооружений при степени влажности грунтов менее 85% и степени консолидации более 10^7 см²/год [5].

4. Характеристики прочности φ' , c' определяются с использованием условий прочности (1,3,5) для испытаний в условиях одноплоскостного среза и условий прочности (6,7) для испытаний в условиях трехосного сжатия.

Оценка результатов неконсолидированно-недренированных испытаний

1. Результатами испытаний является недренированная прочность c_u грунтов. Характеристика недренированной прочности c_u может быть определена в приборе трехосного сжатия или в приборе простого сдвига. Если для этого используется прибор одноплоскостного среза, то необходимо из сравнительных испытаний в условиях трехосного сжатия найти переходный коэффициент.

2. Эффективные напряжения в образце грунта могут отклоняться от эффективных напряжений в массиве исследуемых грунтов. Лабораторные результаты не представляют недренированную прочность грунта в полевых условиях из-за этого различия.

Если испытываемый образец 100 % водонасыщен, то консолидация невозможна ни при действии всестороннего давления, ни в процессе сдвига образца, так как дренирование не допускается. Поэтому, если выполняются несколько испытаний образцов одного и того же грунта и если они все имеют примерно одну и ту же влажность и коэффициент пористости, то они будут показывать примерно одинаковую недренированную прочность. Огибающая кругов Мора бывает обычно горизонтальной прямой линией в широком диапазоне всестороннего давления действующего на образец, если образец полностью водонасыщен (рис. 11).

Так как, имея один и тот же грунт невозможно подготовить три идентичных образца, то диаметр кругов Мора будет различным. В этом случае значение недренированной прочности следует определять как среднее из трех измерений. На графике показывают все три круга Мора и проводят горизонтальную линию, соответствующая среднему значению предельного касательного напряжения.

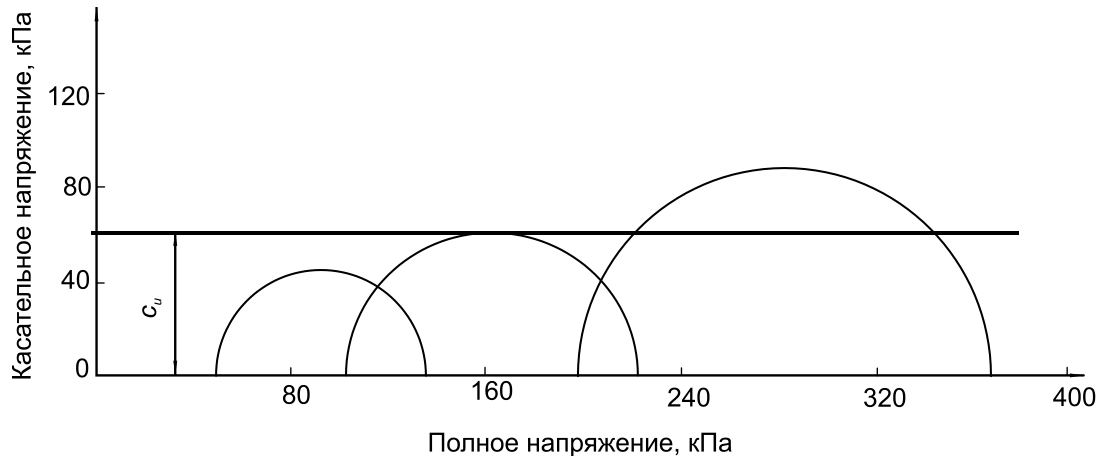


Рис. 11. Результаты неконсолидированно-недренированных испытаний полностью водонасыщенных образцов

3. Если испытываемые образцы частично водонасыщены или испытываются искусственно уплотненные образцы, где степень водонасыщения менее чем 100%, возможна консолидация от всестороннего давления и девиатора напряжений, даже если дренирование не допускается. Поэтому, если испытываются несколько образцов одного и того же грунта при различном всестороннем давлении, они не будут иметь одну и ту же недренированную прочность. Таким образом, предельная огибающая к кругам Мора для консолидировано-недренированных трехосных испытаний частично водонасыщенных (маловлажных) грунтов обычно криволинейная (рис. 12).

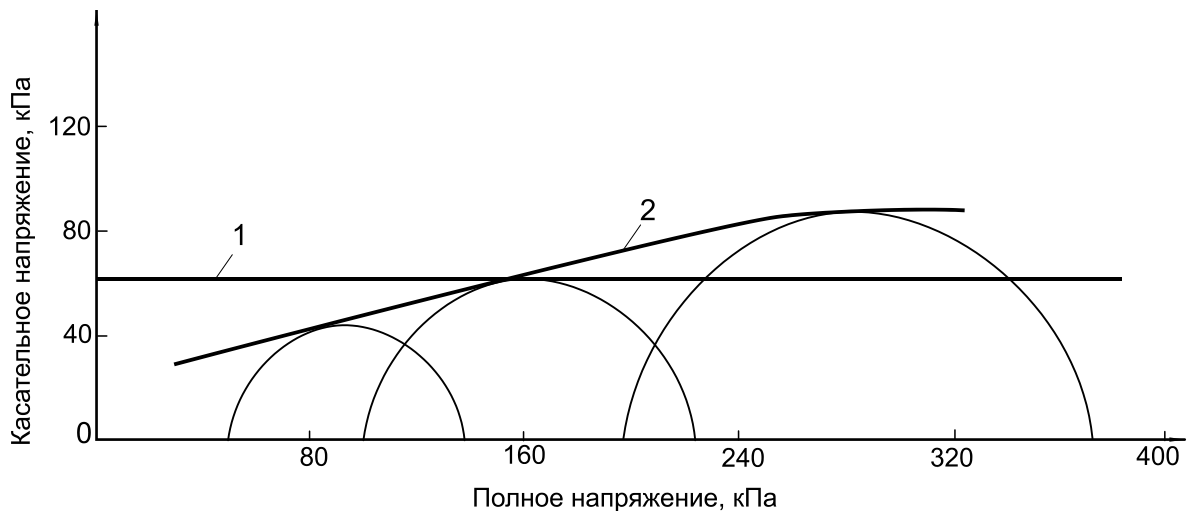


Рис. 12. Результаты испытаний маловлажных грунтов:
1 – предельная прямая; 2 – предельная огибающая

На рис. 12 прямой линией показано среднее значение предельного значения девиатора напряжений, полученное как среднее из трех измерений. Из рис. 12 также видно, что при определении недренированной прочности предельная огибающая не является касательной к кругам напряжений Мора,

а представлена в виде прямой линии (1), которая получена при девиаторе напряжений как среднее значение из трех испытаний $(41+65+89)/3=65$ кПа= c_u . Таким образом, находится значение недренированной прочности маловлажных грунтов. В тоже время, касательная (2) к кругам Мора является криволинейной и значение недренированной прочности зависит от давления.

Для нормально уплотненных глин отношение недренированной прочности к вертикальным эффективным напряжениям от собственного веса грунта, при которых происходило уплотнение в условиях естественного залегания связано также с числом пластичности (рис. 13). Как видно из рис. 13, данная зависимость является линейной.

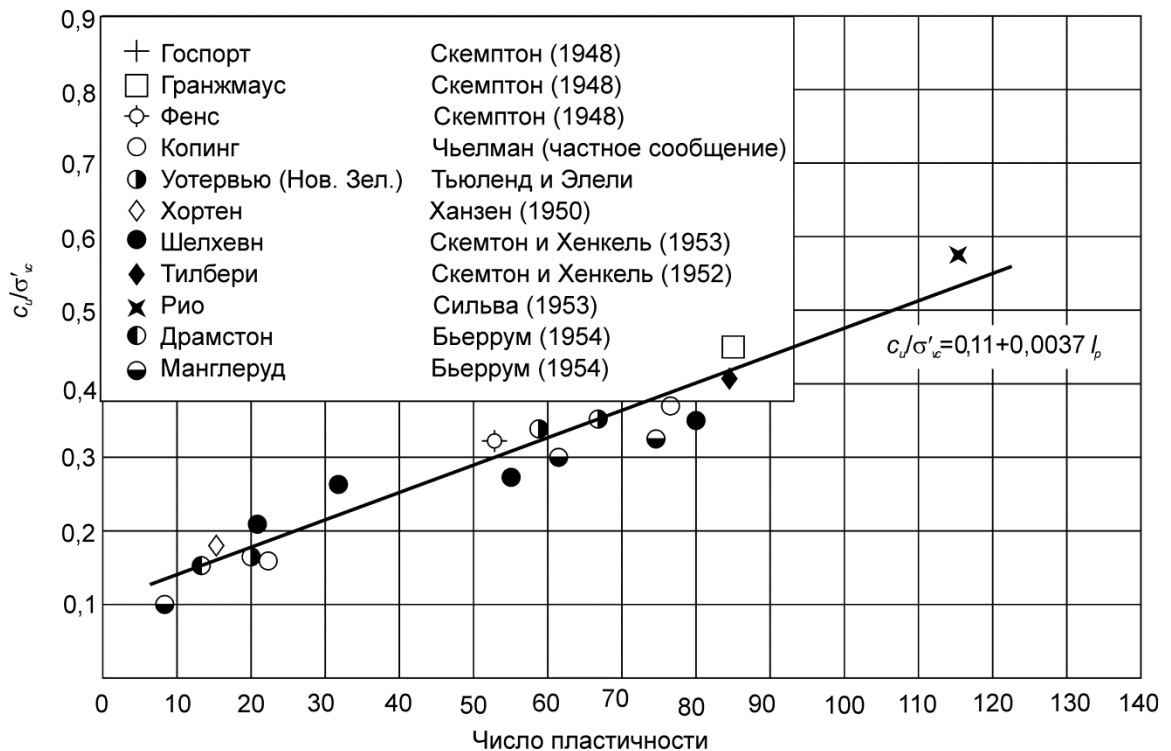


Рис. 13. Зависимость недренированной прочности от числа пластичности для нормально уплотненной глины [1]

Значения недренированной прочности многих переуплотненных глин, определенные в лаборатории, оказываются более значительными, чем значения, определенные в полевых условиях методом статического зондирования или лопастным срезом.

4. Характеристика недренированной прочности c_u используются при расчете устойчивости и прочности оснований в случае высоких темпов возведения сооружения или быстрого нагружения его эксплуатационными нагрузками (резервуары), при отсутствии в основании дренирующих слоев грунта или дренирующих устройств [5].

5. Характеристика недренированной прочности c_u определяются с использованием условия прочности (2) для испытаний в условиях простого сдвига и условия прочности (7) для испытаний в условиях трехосного

сжатия. Величина недренированной прочности c_u находится из испытаний в условиях трехосного сжатия, как среднее из не менее трех испытаний.

Оценка результатов консолидированно-недренированных испытаний

1. При интерпретации результатов испытаний должно быть принято во внимание то, что качество монолитов (нарушение структуры) оказывает большее влияние на недренированную прочность, параметры порового давления и зависимость напряжение-деформация, чем на дренированные параметры прочности.

2. В зависимости от типа испытаний, может быть получена дренированная или недренированная прочность грунта. Соответствующими значениями являются эффективный угол внутреннего трения ϕ' и силы удельного сцепления c' .

3. Прочность водонасыщенных грунтов зависит от приложенных напряжений, времени консолидации, скорости деформации и истории напряжений, которые испытывал грунт в прошлом.

4. В этом методе испытаний характеристики прочности определяют при недренированных условиях и они совпадают с полевыми условиями, если массив грунта был полностью консолидирован при напряжениях от собственного веса (всестороннее сжатие), а затем подвергнут дополнительному нагружению от веса сооружения (девиатор напряжения) при отсутствии времени для дальнейшей консолидации (недренированные условия).

5. Используя поровое давление воды, измеряемое в течение испытания, прочность на сдвиг определенная этим методом может быть выражена в эффективных напряжениях. Эта прочность может быть применена к полевым условиям, где могут встретиться условия полного дренирования или где поровое давление, наведенное дополнительным нагружением может быть оценено, а условия распределения напряжений в массиве подобны принятым в методе испытания.

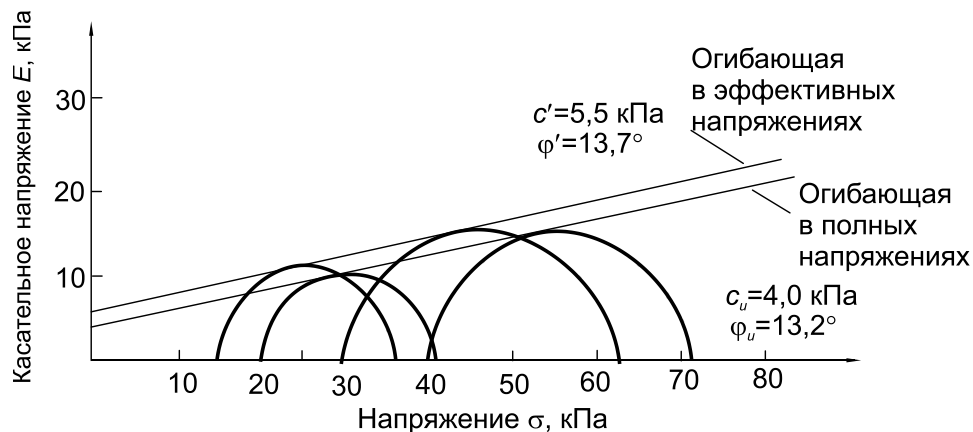


Рис. 14. Результаты КН-испытаний в эффективных и полных напряжениях

6. Прочность на сдвиг определенная из испытания и выраженная в полных напряжениях (недренированные условия) или в эффективных напряжениях (дренированные условия) обычно используется в анализе устойчивости насыпей и котлованов, вычислении активного и пассивного давления грунта.

7. Этот метод полезен при определении характеристик прочности с использованием условия прочности Мора-Кулона. Обычно достаточно провести испытания трех образцов при различном всестороннем давлении для построения огибающей к кругам Мора.

Определение угла дилатансии

Угол дилатансии ψ можно найти из опыта в условиях трехосного сжатия из зависимости:

$$\sin \psi = \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_v - 2\varepsilon_1}, \quad (9)$$

где ε_1 и ε_v – скорости осевой и объемной деформаций.

Этот же угол можно найти, используя пиковое и остаточное значения угла внутреннего трения:

$$\varphi - \varphi_r = 0,8\psi, \quad (10)$$

где φ – угол внутреннего трения на пике напряжений; φ_r – остаточный угол внутреннего трения.

В случае использования зависимости (10), следует иметь ввиду, что значение φ_r определяется при наибольшей осевой деформации, которая как правило, не может быть более 15-20% в приборе трехосного сжатия.

Заключение

1. Вид и количество определяемых из опытов характеристик прочности дисперсных грунтов зависит от условия прочности, которые используется в методах проектирования оснований зданий и сооружений по первой группе предельных состояний – по несущей способности. Поэтому обработку результатов испытаний следует проводить с использованием соответствующего условия прочности Кулона, Мора-Кулона [3,5,6] или модели грунта [9-15].

2. Угол внутреннего трения зависит от траектории нагружения и поэтому должен находиться в опытах с учетом предполагаемого характера деформации грунтов в основании проектируемых зданий и сооружений. В необходимых случаях следует проводить испытания на прочность с использованием различных траекторий нагружения. При проектировании оснований по СП 22.13330 используется угол внутреннего трения, найденный из испытаний по траектории сжатия. В ГОСТ 12248 приведена

методика испытаний на прочность в условиях трехосного сжатия только по траектории сжатия.

3. При определении характеристик прочности переуплотненных грунтов следует учитывать давление предварительного уплотнения, которое испытывали грунты в процессе своего формирования.

Литература

1. Божко, А.Г. Влияние давления предварительного уплотнения на прочностные характеристики лессовых просадочных грунтов. Основания, фундаменты и подземные сооружения: сб.тр. – М.: НИИОСП, 1972. № 63. С. 94–96.
2. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов в лабораторных условиях, 2008. С. 696.
3. ГОСТ 12248-2010. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости, МНТКС, 2010. С. 162.
4. ГОСТ 20522 – 2012 . Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. МНТКС., 2013. С. 20.
5. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений, 2011. С. 162.
6. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты, 2011. С. 90.
7. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под. ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева, 2014. С. 736.
8. МДС 50-1.2007. Проектирование и устройство оснований, фундаментов и подземных частей многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов, 2007. С. 17.
9. Ansys. URL: www.ansys.com.
10. Abaqus. URL. www.3ds.com.
11. Plaxis. URL: www.plaxis.nl.
12. Geo-Slope. URL: www.geo-slope.com
13. Flac. URL: www.itascacg.com.
14. Geotechnical and Geoenvironmental Software Directory. URL:
15. www.ggsd.com.
16. Lewis B.A. Manual for LS-DYNA Soil Material Model 147. Report No. FHWA-HRT-04-095, Federal Highway Administration, 2004. P. 77.
17. NAVFAC DM-7.1. Design manual soil mechanics, 1986. P. 389.